

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОГО ВИТКА МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ С ЛИЦЕВОЙ СВЯЗЬЮ

*А.В. Носов, Р.С. Суворцев, Т.Т. Газизов*

В работе выполнен детальный обзор исследований меандровых линий задержки как устройств защиты от сверхкоротких импульсов. В рамках обзора рассмотрены линии с боковой и лицевой связью. Выполнена оценка влияния параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью на разность погонных задержек четной и нечетной мод линии и среднее геометрическое их волновых сопротивлений. По результатам оценки и оптимизации выбран такой набор параметров поперечного сечения для изготовления макетов меандровой линии, при котором обеспечивается согласование линии с трактом 50 Ом с целью минимизации отражений в измерительном тракте при проведении экспериментальных исследований. Вычислена длина линии, позволяющая разложить сверхкороткий импульс длительностью 100 пс.

**Ключевые слова:** меандровая линия, лицевая связь, оптимизация, волновое сопротивление, погонная задержка, сверхкороткий импульс.

### Введение

В настоящее время основную часть элементов современных цифровых устройств составляют микропроцессоры и системы, построенные на их основе. Их активное развитие в последние несколько десятилетий привело к значительному увеличению быстродействия современных устройств, а также росту их рабочих частот и уменьшению напряжений используемых сигналов. В связи с увеличивающимся уровнем мощности и расширяющимся диапазоном частот электромагнитных воздействий, а также растущим числом их источников разной природы, проявляется необходимость повышения стойкости современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к воздействию электромагнитного излучения. Все реальнее становится угрозой преднамеренного электромагнитного воздействия с целью выведения из строя важных объектов инфраструктуры общества в террористических целях, о чем свидетельствует ряд зарегистрированных случаев такого воздействия [1].

Наиболее опасны импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов, которые могут проникать внутрь РЭА. Традиционно для защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) применяются электромагнитные экраны, различные фильтры, устройства развязки, ограничители помех. Однако эти устройства имеют ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются недостаточное быстродействие, малая мощность, а также наличие паразитных параметров, затрудняющих защиту РЭА от мощных СКИ. Кроме того, реализация такой защиты требует обязательно введения в состав защищаемого устройства

дополнительных компонентов, а защита РЭА от воздействий в широком диапазоне требует построения сложных многоступенчатых устройств, что неизбежно ведет к росту массогабаритных показателей устройства в целом. Между тем на практике требуются простые и дешевые устройства защиты от СКИ. Поэтому актуален поиск новых технических решений.

В этой связи примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании искажений в простой печатной структуре – витке меандровой линии задержки [2–4]. Достоинством подхода является то, что его реализация может не требовать устройства защиты как такового. Вместо него могут быть использованы уже имеющиеся на печатной плате меандровые линии, прямое назначение которых – задержка сигнала на печатной плате для тактирования импульсных сигналов в точках приема.

Защита от СКИ с помощью предложенного подхода достигается ослаблением его амплитуды за счет разложения сигнала на последовательность импульсов с меньшей (относительно исходной) амплитудой. Для этого необходимо выполнить ряд условий, связывающих параметры меандровой линии и длительность СКИ. Так, для линии с однородным диэлектрическим заполнением необходимо, чтобы импульс основного сигнала пришел к концу линии по окончании импульса перекрестной наводки на ближнем конце линии (в терминологии связанных линий) за счет обеспечения нескольких простых условий [5, 6]. Основным из них является значение задержки в линии большее, чем длительность СКИ. Тогда за счет оптимизации связи между сигнальными проводниками линии могут быть обеспечены минимизация и равенство амплитуд импульсов наводки и основного сигнала на выходе линии [2]. В линии с неоднородным

родным заполнением могут различаться скорости распространения мод, что может быть использовано для разложения основного сигнала на несколько импульсов. Для этого необходимо, чтобы значение удвоенного произведения модуля разности погонных задержек мод сигнала на длину линии было больше длительности СКИ. Обеспечение этого позволяет дополнительно ослабить амплитуду СКИ в 1,5 раза в линии с боковой связью [3]. Указанная возможность разложения СКИ в витке меандровой микрополосковой линии доказана экспериментально и продемонстрировано ослабление СКИ в 6,3 раза [7, 8].

Также, доказана экспериментально возможность разложения СКИ в С-секции с лицевой связью, на выходе которой максимальный уровень сигнала составил 24% от уровня сигнала на ее входе [9]. Однако совершенно неосвещенными остались результаты предварительного моделирования, которое является важным этапом перед проведением экспериментальных исследований и позволило уменьшить затраты на изготовление конечного устройства, а также получить физически реализуемые по обычной технологии печатных плат значения параметров поперечного сечения исследуемой структуры. На практике в межсоединениях печатных плат существуют потери, дисперсия, отражения от неоднородностей и множество других факторов, которые зачастую сложно учесть при проектировании. Кроме того, корректность функционирования реальных устройств РЭА в определенной степени зависит от качества изготовления печатной платы. Зачастую, технологические ограничения, которые накладываются предприятием-изготовителем, не позволяют реализовать некоторые идеи и подходы на практике. Тогда разработчики прибегают к средствам параметрической оптимизации для отыскания наиболее приемлемого набора параметров с учетом технологических возможностей предприятия-изготовителя и требований решаемой задачи. Поэтому цель данной работы – представить результаты предварительного моделирования и оптимизации параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью с учетом типовых параметров материалов для изготовления печатных плат.

### Исходные данные для моделирования

Поперечное сечение и схема соединений исследуемой линии представлены на рис. 1. Все проводники линии имеют одинаковую ширину ( $w$ ) и толщину ( $t$ ), а буквы «О» и «А» введены для обозначения опорного и сигнального (активного) проводников (рис. 1а). Линия со-

стоит из двух параллельных проводников длиной  $l$ , соединенных между собой на одном конце. Один из проводников линии соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме рис. 1б идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . Другой проводник линии соединен с приёмным устройством, представленным на схеме сопротивлением  $R2$ . Оптимизация параметров линии выполнялась в системе TALGAT [10].

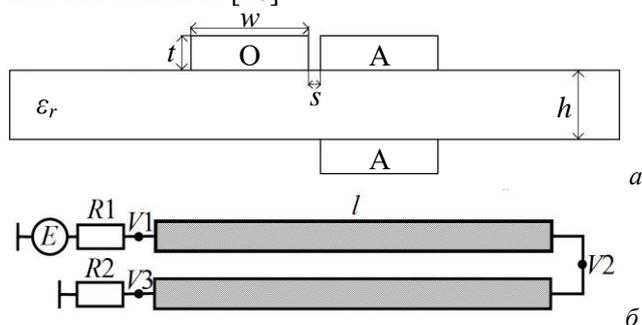


Рисунок 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) витка меандровой линии с лицевой связью

Поскольку натурный эксперимент предполагалось проводить на базе комбинированного осциллографа С9–11 (с внутренним сопротивлением 50 Ом и полосой рабочих частот 17,8 ГГц), то известна минимальная длительность импульса (около 100 пс), которая может быть обеспечена его генератором. Для разложения такого импульса нужно, чтобы значение удвоенного произведения модуля разности погонных задержек мод линии на ее длину было больше 100 пс. Еще одним важным условием является минимизация отражений в измерительном тракте осциллографа. Для этого необходимо согласование характеристического импеданса исследуемой линии с трактом. Это может быть обеспечено равенством среднего геометрического волновых сопротивлений мод сопротивлению измерительного тракта 50 Ом.

В качестве материала основы выбран материал FR-4. В соответствии с технической документацией изготовителя печатных плат, на частоте 1 МГц диэлектрическая проницаемость материала может варьироваться в диапазоне от 3,5 до 4,1 [11]. Поэтому при моделировании принято среднее значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r=3,8$ . Типовыми фиксированными геометрическими параметрами, которые изменяются дискретно, для выбранного материала являются толщина слоя основы ( $h=500, 1000, 1500, 2000$  мкм) и толщина фольги ( $t=18, 35$  мкм). Варьируемыми параметрами являются ширина сигнального проводника ( $w$ ) и расстояние между сигнальным и опорным проводниками ( $s$ ).

### Результаты оптимизации

Выполнены оценки влияния параметров поперечного сечения исследуемой линии на изменение разности погонных задержек мод ( $\Delta\tau$ ) и среднее геометрическое их волновых сопротивлений ( $Z_C$ ). В результате исследований выявлено, что результаты расчета  $\Delta\tau$  и  $Z_C$  для разных значений толщины фольги отличаются незначительно (максимальное отклонение для  $\Delta\tau$  составляет 2%, а для  $Z_C$  – 1,3%), поэтому целесообразно привести результаты только для одного значения, например для  $t=18$  мкм. На рис. 2, 3 приведены зависимости  $\Delta\tau$  при изменении  $w$  и  $s$  для разных  $h$ , а на рис. 4, 5 – зависимости  $Z_C$  при тех же параметрах. При этом значение  $w$  изменялось в диапазоне от 1 до 10 мм с шагом 1 мм (при фиксированных  $s=0,2$  и 1 мм), а значение  $s$  – от 0,2 до 1 мм с шагом 0,1 мм (при фиксированных  $w=1$  и 10 мм).

Из рис. 2 видна нелинейная зависимость  $\Delta\tau$  от  $w$ . При  $s=0,2$  мм и  $h=0,5$  мм  $\Delta\tau$  имеет наибольшие значения, изменяющиеся от 1,2 до 2,2 нс/м при увеличении  $w$  от 1 до 10 мм. При  $s=1$  мм наблюдается аналогичное поведение зависимостей, однако значения  $\Delta\tau$  сдвигаются выше и изменяются от 1,6 до 2,6 нс/м при увеличении  $w$  от 1 до 10 мм. При увеличении  $h$  график зависимости  $\Delta\tau$  сдвигается ниже. Минимальные значения  $\Delta\tau$  соответствуют  $h=2$  мм и составляют около 0,56 нс/м и 1,59 нс/м при  $s=0,2$  и 1 мм соответственно. Поэтому с точки зрения максимизации длительности СКИ, который может быть разложен в линии с фиксированной длиной  $l$ , предпочтительнее в качестве основы печатной платы выбрать материал с  $h=0,5$  мм при наибольшем  $w$ . Аналогичное поведение наблюдается для зависимостей  $\Delta\tau$  от  $s$ , приведенных на рис. 3. Однако при  $w=1$  мм,  $h=1,5$  и 2 мм в зависимостях появляется слабо выраженный минимум,  $\Delta\tau$  изменяется слабо, а ее среднее значение составляет около 0,69 и 0,58 нс/м соответственно.

Из рис. 4 видна нелинейная зависимость  $Z_C$  от  $w$ . При увеличении  $h$  график зависимости  $Z_C$  сдвигается вверх по оси ординат. По мере увеличения  $w$  значение  $Z_C$  уменьшается. Из зависимостей также видно, что при всех значениях  $h$  существует такое значение  $w$ , при котором  $Z_C=50$  Ом. Так, при  $s=0,2$  мм, среднее геометрическое волновых сопротивлений мод линии составляет 50 Ом при  $w=2,8, 4,7, 6$  и  $7,9$  мм для  $h=0,5, 1, 1,5$  и 2 мм соответственно, а при  $s=1$  мм – при  $w=4,6, 7, 9$  и  $10,5$  мм для  $h=0,5, 1, 1,5$  и 2 мм соответственно. Противоположное поведение наблюдается для зависимостей  $Z_C$  от  $s$  – по мере увеличения  $s$  значение  $Z_C$  увеличивается (рис. 5). Наименьшее значение  $Z_C$  при  $w=1$  мм соответствует  $s=0,2$  мм для  $h=0,5$  мм и

составляет 76,96 Ом, а при  $w=10$  мм оно составляет 25,26 Ом.

С учетом проведенных исследований выполнена оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью. После оптимизации получены следующие параметры поперечного сечения (рис. 1а):  $t=18$  мкм,  $s=0,2$  мм,  $h=1,5$  мм,  $w=6$  мм. При данных значениях параметров обеспечиваются значения  $Z_C=50,36$  Ом и  $\Delta\tau=1,43$  нс/м. Из последнего следует, что для разложения импульса с длительностью 100 пс длина линии должна быть не менее 35 мм.

## Заключение

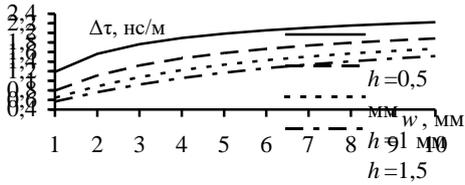
Таким образом, представлены результаты оценки влияния изменения параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью на значение разности погонных мод и среднего геометрического их волновых сопротивлений, а также выполнена оптимизация параметров поперечного сечения. В результате исследований выбраны значения параметров поперечного сечения для изготовления макетов меандровой линии, при которых обеспечивается согласование линии с измерительным трактом, а также вычислена длина линии, позволяющая разложить СКИ с длительностью 100 пс.

Примечательно, что при данном наборе физически реализуемых по обычной технологии печатных плат значений параметров поперечного сечения исследуемой структуры достижимы значения  $Z_C$  не только 50 Ом (СВЧ-тракт), но и 75 Ом (телевизионный тракт), 100 Ом (Ethernet) и др. (рис. 4, 5), что показывает возможность более широкого использования результатов работы. Важна и показанная возможность получения довольно высоких значений  $\Delta\tau$ , достигающих 2,6 нс/м (рис. 2) на обычном стеклотекстолите. Наконец, из полученных графиков легко оценить чувствительность характеристик к отклонениям соответствующих параметров, что важно для практики.

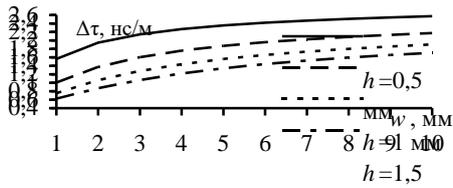
*Обзор выполнен в рамках реализации проекта №8.9562.2017/БЧ Минобразования РФ, вычислительный эксперимент выполнен за счет гранта РНФ 14-19-01232 в ТУСУРе.*

## Литература

1. Петкау О., Тарабцев А., Дерябин А., Ларионов С., Чванов В. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия // Безопасн. объект. ТЭК., № 2 (6), 2014. – С. 74–76.
2. Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolovsky A.M. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses.

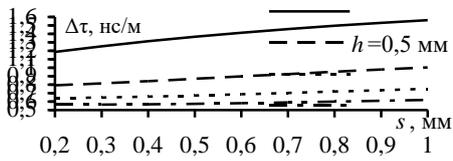


a

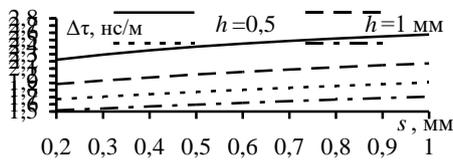


б

Рисунок 2. Зависимости  $\Delta\tau$  от  $w$  для разных  $h$  при  $s=0,2$  (a) и 1 мм (б)

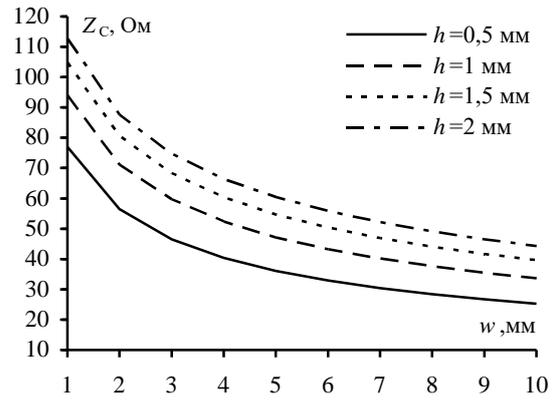


a

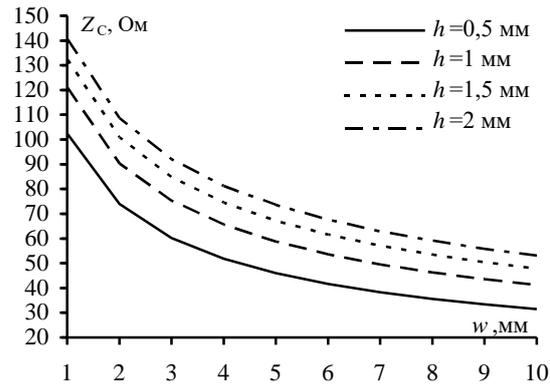


б

Рисунок 3. Зависимости  $\Delta\tau$  от  $s$  для разных  $h$  при  $w=1$  (a) и 10 мм (б)

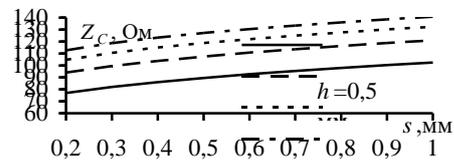


a

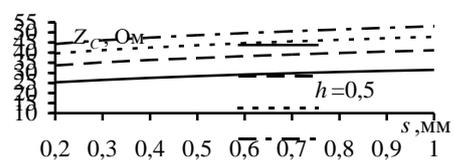


б

Рисунок 4. Зависимости  $Z_c$  от  $w$  для разных  $h$  при  $s=0,2$  (a) и 1 мм (б)



a



б

Рисунок 5. Зависимости  $Z_c$  от  $s$  для разных  $h$  при  $w=1$  (a) и 10 мм (б)

- Proc. of Siberian Conference on Control and., Omsk, Russian Federation, 2015. – pp. 1–7.
3. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. Proc. of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk, Russian Federation, 2015, pp. 1–3.
  4. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 58, no. 4, 2016, pp. 1136–1142.
  5. Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Орлов П.Е. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. Радиоэлектр., № 4 (34), 2014. – С. 36–40.
  6. Линия задержки, неискажающая импульс: пат. 2556438 РФ, № 2013159347/08; заявл. 30.12.2013; опубл. 16.06.2015, Бюл. №19.
  7. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. к-та техн. наук. Томск, 2016. – 248 С.
  8. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line. Proc. of X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines». Omsk, Russian Federation, 2016, pp. 151–154.
  9. Носов А.В., Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. Радиоэлектр., – № 3 (19), 2016. – С. 47–50.
  10. Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. Радиоэлектр., № 2 (36), 2015. – С. 45–50.
  11. Производство печатных плат. Монтаж печатных плат. ООО «МАЗТранс» URL: <http://www.mazhtrans.tomsk.ru>, (дата обращения 01.03.2017).

**Носов Александр Вячеславович**, магистрант кафедры телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. 8 (382-2) 41-34-39; E-mail: alexns2094@gmail.com.

**Суровцев Роман Сергеевич**, к.т.н., доцент каф. ТУ ТУСУР. Тел. 8 (382-2) 41-34-39; E-mail: surovsevr@gmail.com.

**Газизов Тимур Тальгатович**, к.т.н., с.н.с. каф. ТУ ТУСУР. Тел. 8 (382-2) 41-34-39; E-mail: timurtsk@gmail.com.

## PARAMETRIC OPTIMIZATION OF PROTECTIVE TURN OF MEANDER LINE WITH BROAD-SIDE COUPLING

*Nosov A. V., Surovtsev R.S., Gazizov T.T.*

Abstract – Detailed review of the investigations of meander delay lines as the protective devices against ultrashort pulses is carried out in the paper. The review examined the lines with the edge and broad-side coupling. Estimation of influence of cross section parameters of meander line turn with broad-side coupling on the difference of per-unit-length delays of even and odd modes of the line and on geometric mean of their impedances is carried out. According to evaluation and optimization results, for design of meander lines prototypes we set cross section parameters which correspond to matching the line with the tract of 50 Ohm aimed to minimize the reflections in the measuring tract in the full-scale experiment execution. The line length permitting to decompose ultrashort pulse with duration of 100 ps is calculated.

**Keywords:** *meander line, broad-side coupling, the even and odd modes, ultrashort pulse.*

**Nosov Alexander Viacheslavovich**, Master student of the Television and Control Department, TUSUR. Tel. 8 (382-2) 41-34-39; E-mail: alexns2094@gmail.com.

**Surovtsev Roman Sergeevich**, PhD of Engineering science, assistant professor of the Television and Control Department, TUSUR. Tel. 8 (382-2) 41-34-39; E-mail: surovsevr@gmail.com.

**Gazizov Timur Talgatovich**, PhD of Engineering science, Senior Researcher of the Television and Control Department, TUSUR. Tel. 8 (382-2) 41-34-39; E-mail: timurtsk@gmail.com

### References

1. Pektau O., Tarabartsev A., Deryabtsev A., Larionov S., Chvanov V. Zashhita objektov toplivno-energeticheskogo kompleksa ot ugroz elektromagnitnogo vozdejstvija [Protection of the fuel & energy sector of threats of electromagnetic influence] The security and safety of fuel and energy complex facilities, 2014, no. 2 (6), pp. 74–76.
2. Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolovsky A.M. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses., Proc. of Siberian Conference on Control and Communications., Omsk, Russian Federation, 2015. – pp. 1–7.
3. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line, Proc. of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk, Russian Federation, 2015, pp. 1–3.
4. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 58, no. 4, 2016, pp. 1136–1142.
5. Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Orlov P.E. Rasprostranenie impul'sa v meandrovoj linii s neodnorodnym dijelektricheskim zapolneniem bez iskazhenij ego formy perekrestnymi navodkami [Signal propagation in the meander line with nonhomogeneous dielectric filling without distortions of its waveform by crosstalk]. Dokladi Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija I radioelektroniki, 2014, no. 4(34), pp. 36–40.
6. Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Non-jamming delay line. Patent RF, No. 2556438, 2013.
7. Surovtsev R.S. Vychislitel'nye algoritmy, metodiki i rekomendacii dlja proektirovanija bortovoj radioelektronnoj apparatury kosmicheskogo apparata s uchetom jelektromagnitnoj sovmesi-mosti. Dis. kand. techn. nauk [Numerical algorithms, methods and recommendations for the designing of on-board electronics of the spacecraft based on electromagnetic compatibility. PhD of Engineer. sci. diss.]. Tomsk, 2016. 248 p.
8. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line, Proc. of X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Omsk, Russian Federation, 2016, pp. 151–154.
9. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. Jeksperimental'noe podtverzhenie vozmozhnosti zashhity radioelektronnoj apparatury ot sverhkorotkogo impul'sa za schet ego razlozhenija v S-sekcii s licevoj svjaz'ju [Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling]. Dokladi Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija I radioelektroniki, 2016, no. 3(19), pp. 47–50.
10. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.O., Gazizov T.R. Novye vozmozhnosti sistemy modelirovanija jelektromagnitnoj sovместimosti TALGAT [New features of electromagnetic compatibility in TALGAT simulation software]. Dokladi Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija I radioelektroniki, 2015, no. 2(36), pp. 45–50.
11. Proizvodstvo pechatnyh plat. Montazh pechatnyh plat. ООО «MAZhtrans» [PCB production. PCB Assembly. LLC "MAZhtrans"] Available at: <http://www.mazhtrans.tomsk.ru>, (accessed 01.03.2017).